第4章

未来のロボットの筋肉

環境からの反作用力に対応する柔軟なアクチュエータの開発最前線

高木賢太郎，羅 志偉

モータと力センサ，位置センサを組み合わせるだけでは，柔らかい制御の実現に自ずと限界がある．ここでは，時々刻々と変化するロボット周辺の環境に対して，柔軟に対応できる新しいアクチュエータを紹介する．（編集部）

黒板に文字を書いたり，ドアを開けたり，機械部品を組み立てたり，薄板を曲げたり，人と握手をしたり，被介護者を抱き上げたりなどの作業は，すべて外部環境や操作対象物との機械的な相互作用を伴う作業です．

われわれ人間はこうした接触作業について，今までに開発されたどのロボットよりも，ましてどんな動物よりも，上手に作業をこなすことができます．これが，人間の冗長な運動自由度に由来していることは，だれも否定できませんが，根本には，人間のやわらかな筋肉およびそれを柔軟に制御する神経メカニズムに起因していると考えられています．

● ロボットは環境の時空間的な特性に順応しながら，自律的に作業をすることが求められる

一般にロボットが作業をするとき，環境から幾何学的な拘束あるいは動力学的な拘束を受けます．作業の過程で環境に変化が起こったり，不確かさが存在したりするのはしばしばあることで，正確に環境を記述し，詳細に作業計画を立て，フィードフォワード的に作業教示をすることは現実的に不可能です．また，計画と制御の過程で必ず誤差も生じます．

従って，環境からの反作用力を外乱とみなして，それを抑制したり，作業計画の段階で設定した目標軌道に忠実に従うようにシステムを制御したりする従来のフィードバック制御では，作業目的がうまく達成できません．場合によっては，システムと環境双方に大きなダメージを与えてしまうことすらあります．従って，目的とする作業を実現するためには，ロボットが自ら環境の時空間的な特性を十分に考慮にいれ，それに柔軟に順応しながら自律的に作業をする，いわゆるシステムのコンプライアンス制御が必要です．

このコンプライアンス制御には，環境の幾何学的な空間特性に応じ，システムの制御空間を自由運動制御空間と拘束運動空間に分割してロボットの位置と力のハイブリッド制御を行ったり，慣性や粘弾性といった環境の機械的な特性に対処し，ロボットの適切な機械インピーダンスあるいは規範動作モデルを設定したりするといった手法が挙げられます．さらに，認識した環境モデルと実環境との間に差が存在するので，それが作業にどのように影響を及ぼすか，また，いかにしてその影響を最小限に留めることができるのかを考える必要があります．

● 生物らしい柔軟な運動特性をロボットに実現させるために，インピーダンス制御方式が提案されている

従来のロボット技術では，主に電気モータを駆動源に用いて，また，大きな力を発生させるために高いギア比のトルク伝達機構を組み込んでいたので，結果としてロボットは外力に対して高い剛性をもって位置制御の精度を保ちます．その反面，環境の変動や対象物体との接触などから生

KeyWord 電場応答性高分子，人工筋肉，イオン導電性高分子，導電性高分子，電歪高分子，高分子アクチュエータ，ヘビ型ロボット，エイ型ロボット，IPMC

じる機械的な作用を受け入れ，次の動作に反映することはできませんでした．

これに対して，生物の骨格筋は神経刺激を与えていない状態では基本的に柔らかく，また，神経刺激の頻度に応じて柔軟性を変えられます．関節レベルでは，一関節の運動に対して多数の筋肉がきっ抗的に同時に活動し，こうしたきっ抗筋の同時活動の強さで関節の硬さを変えるようにしています．これによって他人と握手するときに，相手の柔軟性に応じて調和の取れた運動ができるようになります．

こうした生物らしい柔軟な運動特性をロボットに実現させるために，インピーダンス制御方式が提案されています．この方式を理解してもらうには，まず機械的なインピーダンスとは何かについて説明しておく必要があります．

図1に示す3種類の機械部品について，それぞれに対して加える力Fと，それに応じて生じた変位Xとの間に以下の関係式が成り立ちます．つまり，

ばね　：$F = KX$

ダンパ：$F = DV$

質量　：$F = Ma$

また，力Fを電圧v，変位の速度Vを電流iと見なすと，上の各機械部品がちょうど回路のコイルLと抵抗R，コンデンサCと同じ特性と言えます．従って，ばね，ダンパと質量で構成している機械における入力と，それに応じて生じた変位間の関係を，電気回路の言葉を引用して「機械インピーダンス」と称しています．

図1　3種類の基本的な機械部品
回路中のコイルLと，抵抗R，コンデンサCに等価である．

● 力センサを用いたロボットの機械インピーダンス調節には限界がある

さて，外部環境と接触するロボットについて，位置制御を施している場合，外力から見たその機械インピーダンスはどうなるのでしょうか．簡単のため，**図2**に示す1回転自由度をもつロボット・アームについて考えてみましょう．**図3**にこのロボットの位置PD（proportional derivative）制御のブロック線図を示します．この図から外力Fとロボットの回転角度間の関係を，以下のように簡単に導出できます．

$$-Fl = I\ddot{\theta} + K_v \frac{m}{n}\dot{\theta} + K_p \frac{m}{n}(\theta - \theta_d)$$

電気モータから大きな力をロボット・アームに与えるためには，ギア比m/nを大きくすればよいのですが，その結果，外力Fで見たロボットの剛性K_p・m/nが大きくなってしまうことは，この式から容易に理解できます．

それでは，このロボット・アームの機械インピーダンスを小さくするにはどうすればよいでしょうか．インピーダンス制御方式では，力センサを用いて外力Fを計測し，**図4**のようにフィードバックすることでロボットの機械インピーダンスを，

図2　1回転自由度のロボット・アーム

図3　1回転自由度のロボット・アームの位置PD制御
電気モータから大きな力をロボット・アームに与えるために，ギア比m/nを大きくすればよいが，その結果，外力Fで見たロボットの剛性Kp・m/nが大きくなってしまうことが容易に理解できる．

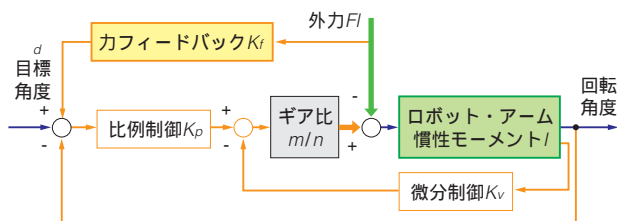



図4　1回転自由度のロボット・アームのインピーダンス制御
力フィードバックを行うことでロボットの機械インピーダンスを$(K_p m/n)/(1+K_p K_f m/n)$と変えられる．

4

$$-Fl=\frac{1}{1+K_pK_f\frac{m}{n}}\left(I\ddot{\theta}+K_v\frac{m}{n}\dot{\theta}+K_p\frac{m}{n}\left(\theta-\theta_d\right)\right)$$

と変えられます．ただし，原理的には力を高周波帯域まで正確に測定することが不可能なため，力センサを用いたロボットの機械インピーダンス調節に限界が生じます．従って，力フィードバックだけでなく，ロボットの駆動アクチュエータ自身が生物の筋肉のような柔軟性を持つことが重要となります．

●「人工筋肉」としての電場応答性高分子

従来の電磁モータなどに替わり，ロボットのための「人工筋肉」として，ソフト・アクチュエータが近年注目されています[(1)〜(5)，(8)(9)]．アクチュエータとは，指令信号を受け取って力や変位などの動きを生成する要素のことで，センサと対になる言葉です．

ソフト・アクチュエータとは，その名のとおり柔軟な材料でできた柔らかいアクチュエータのことです．特に，ソフト・アクチュエータのなかで，電圧(または電流)によって駆動できる高分子を電場応答性高分子(EAP：electro-active polymer)と呼びます[(1)]．

電場応答性高分子は国内外で注目を集めつつあり，Bar-Cohen博士(NASA)のWebページ(http://eap.jpl.nasa.gov/)には，世界中から研究の紹介や人工筋肉関連のニュースが集められています．また，解説記事や書籍もいくつか出版されています．

ある学会(SPIE)では，人工筋肉アーム・レスリングと題して，人間と，高分子アクチュエータを用いたロボット・アームとの腕すもう大会も開催されました．図5はBar-Cohen博士のWebページにあるポスターです．筆者も見に行きましたが，残念ながらいずれのアームも対戦相手の女子高生に勝つことはできませんでした．しかし，高分子アクチュエータを用いたロボットの実現に向けて，研究開発が着実に進みつつあることを感じました．なお，一部の電場応答性高分子アクチュエータについては，既にイーメックスや米国AMI(Artificial Muscle Inc.)などによって製品化がはじまりつつあります．

図5[(11)] 高分子アクチュエータを用いたロボット・アームとの腕すもう大会のポスター

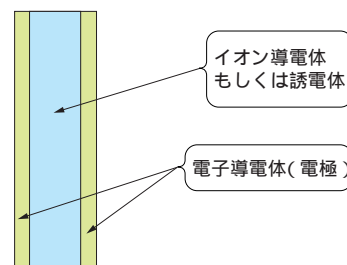
ところで，人工筋肉という言葉を用いる際には注意が必要です．まず，人工筋肉という言葉から，人間の筋肉の代わりができるかのようなイメージを持たれるかもしれませんが，電圧の問題や生体適合性の問題が解決されていないため，現状では電場応答性高分子を体内に埋め込んで用いることはできません．また，後述する電場応答性高分子の動作原理は生体筋とは全く異なるため，筋肉と同じ特性を模倣するには何らかの制御が必要になります．生物の骨格筋は，高効率で自己修復機能を有する超高性能アクチュエータであるといえますが，人工的に実現するにはまだまだ時間がかかりそうです．そのため，ここでは電場応答性高分子を「ロボットのための人工筋肉」として位置づけたいと思います．

1．電場応答性高分子のいろいろ

多くの種類の電場応答性高分子アクチュエータが研究，開発されている中で，ここでは，研究例も多くて実用化に近いところまで開発が進んでいる材料について紹介します．それは，イオン導電性高分子，(電子)導電性高分子，電歪高分子の3種類のアクチュエータ材料です．

図6に示すように，いずれもイオン導電体または誘電体が電子導電体(電極)に挟まれた構造です[(3)]．以下では，それぞれの材料の特徴と応答原理について，簡単に触れたいと思います．

図6 電場応答性高分子アクチュエータの構造

イオン導電体または誘電体が電子導電体(電極)にはさまれている．

● イオン導電性高分子

1992年，工業技術院大阪工業技術研究所（現在は産業技術総合研究所 関西センター）の小黒氏らは，金属を接合したイオン交換樹脂膜が水中で屈曲する現象を発見しました．

写真1に示すように，一般的なイオン導電性高分子アクチュエータは，イオン導電性高分子膜の両面に電極が接合された構造をもっています．典型的なイオン導電性高分子アクチュエータは，Nafion（米国DuPont社）などのイオン交換樹脂膜に，金や白金などの貴金属を無電解めっきすることによって作ります．そのため，イオン導電性高分子・金属複合体（ionic polymer-metal composite：IPMC）アクチュエータと呼んでいます．また，ICPF（ionic conducting polymer gel film）とも呼ばれています．

写真2に示すように，水中または湿潤した状態のIPMCに数Vの電圧を加えると，即座に屈曲します．ポリマーにNafionを用いた場合には陽極のほうへ曲がります．伸縮型ではなく，屈曲型のアクチュエータです．

応答の原理は，**(1)** 電圧を加えることによって高分子内のイオンと水分子が移動し（電気浸透現象），**(2)** その効果で高分子が膨潤して，**(3)** 応力が発生して屈曲すると考えられています．**図7**に動作原理を示します．また，変形量も大きく，機械的・化学的耐久性などにも優れています．

しかし，膜状のアクチュエータであるため，発生力は小さく，たかだか数gf程度の力しか取り出せないことが欠点として挙げられます．この点は並列化や機構を工夫することによって改善できるかもしれません．または，マイクロ化をして小型ロボットへの利用が適当だと考えられます．なお，動作に水などの溶媒が必要な点については，不揮発性の溶媒を用いることによって空中動作を可能にする研究もなされています．

● 電子導電性高分子

電子導電性高分子は高分子であるにもかかわらず電流を流すことのできる材料で，白川英樹先生の2000年ノーベル化学賞でも有名ですが，これをアクチュエータとして利用することは1991年にBaughmanによって提案されました[(3)]．

電子導電性高分子アクチュエータの動作原理を**図8**に示します．応答の原理は，ポリアニリン，ポリピロールなど

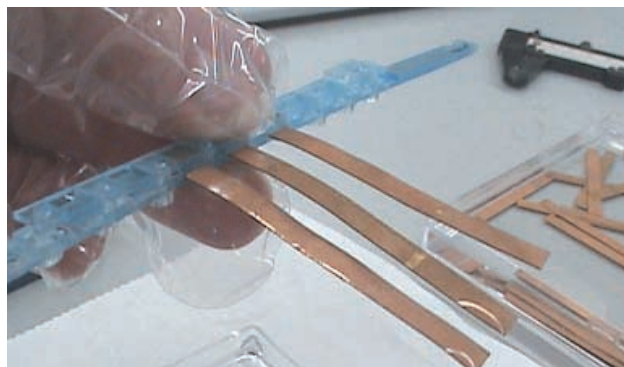



写真1[注1] **イオン導電性高分子アクチュエータ**
Nafion（DuPont社）などのイオン交換樹脂膜に，金や白金などの貴金属を無電解めっきすることによって製作される．

注1：写真は理研BMC提供．

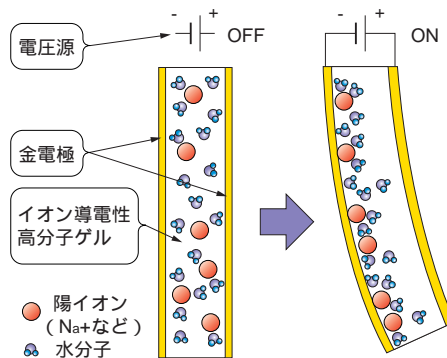
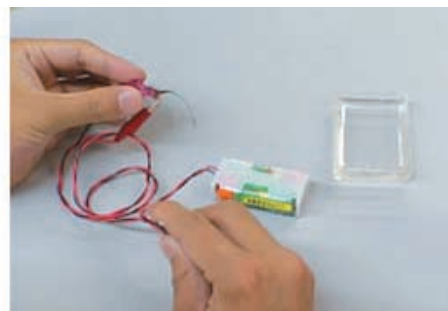



図7　イオン導電性高分子アクチュエータの動作原理

(a) 上方向に曲がる

(b) 下方向に曲がる

写真2[注1]
IPMC屈曲のようす
湿潤した状態のIPMCに数Vの電圧を加えると即座に屈曲する．

の導電性高分子が酸化還元状態の違いによって膨潤収縮することを利用するものです．電解質中で数Vの電圧を加えることで伸縮動作をします．発生応力，変形量は共に大きく，数MPaもの出力が得られるものも製作できます．しかし，IPMCや後述の電歪高分子に比べると，応答速度が遅いという欠点があります．

● 電歪高分子

電歪高分子アクチュエータは，誘電体など電歪材料を柔軟な電極で挟んだ構造をもちます．代表的なものとしては，シリコーンなどの柔軟なポリマーにカーボンなどを用いた柔軟電極を張り付けた，誘電エラストマー(dielectric elastomer)が知られています．

先の二つのアクチュエータの動作原理が電気化学反応をもとにしているのに対して，電歪高分子の動作原理は電極間の静電気力(Maxwell応力)を利用します．電極が静電気力によって引き付け合い，その結果ポリマーが伸びることが動作原理であり，電圧の向きによらず伸びるタイプのアクチュエータです(**写真3**，**図9**)．

駆動には通常，数千Vという非常に高い電圧を加えます．発生応力は電歪現象であることから，電圧の2乗に比例し，シリコンを用いたものではおよそ30％のひずみ，またはおよそ1MPaの応力を発生するとの報告もあります．

このタイプの高分子は応答も速く，発生する力も大きいことから，ヒューマノイド・サイズのロボット用アクチュエータとしても期待されます．しかし，耐久性や高い電圧による絶縁破壊など課題も残されています．また，高電圧駆動回路が必要となるため，高圧アンプ回路の研究・開発が待たれています．

3種類の高分子アクチュエータの特徴を**表1**に示します．なお，近年では材料の開発が進み，この表に当てはまらないものもあるようです．

はじめにも少し触れましたが，イオン導電性高分子，電子導電性高分子はイーメックスから研究用として販売されています．また，AMIからは電歪高分子を用いたアクチュエータが販売されています．

(a) 電気化学的酸化（ドーピング）

(b) 電気化学的還元（脱ドーピング）

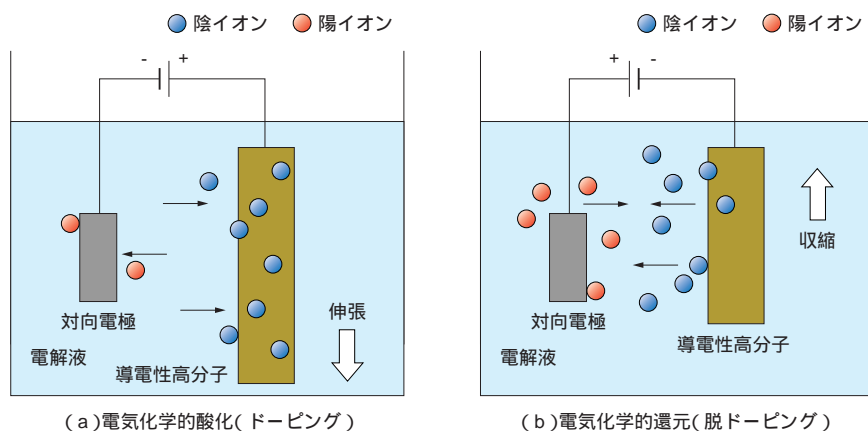



図8 電子導電性高分子アクチュエータの動作原理
導電性高分子が酸化還元状態の違いによって膨潤収縮することを利用．

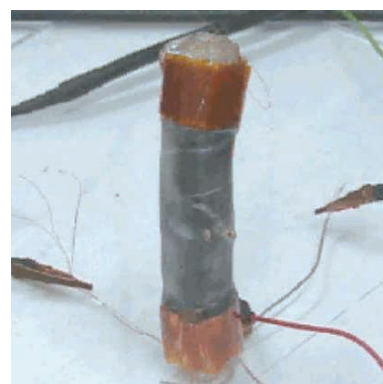



写真3[14] **電歪高分子アクチュエータ**
電極が静電気力によって引き付け合い，その結果ポリマーが伸びる．

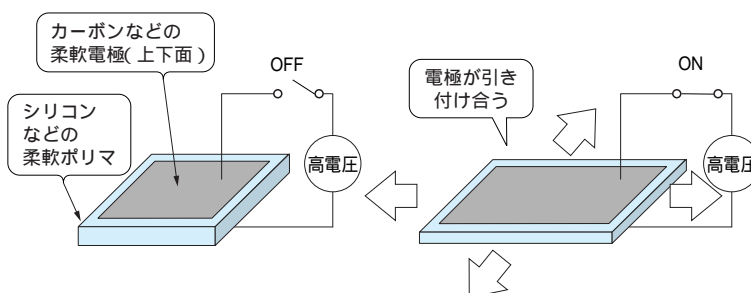



図9
電歪高分子アクチュエータの動作原理
駆動には通常，数千Vという非常に高い電圧を加える．

2. 理化学研究所における取り組み

理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターでは，産業技術総合研究所と共同で，主にイオン導電性高分子アクチュエータの応用に関して，ロボティクスと制御工学の観点から研究を行っています．もちろん，高分子アクチュエータを用いた研究は，材料開発から応用に至るまで国内，国外で数多くなされていますが，ここでは筆者のグループによる研究のみを紹介します．

● ヘビ型ロボット，エイ型ロボット

IPMCは湿潤した状態で動作するため，電磁モータが苦手とする水中においては逆に有利な状況となります．この特徴はIPMCを小型水中ロボットとして利用するのに適していると考えられます．また，アクチュエータの柔軟性を利用して，生物の遊泳を模倣，解明することを目的として研究を進めています．

理化学研究所では，ヘビ型ロボット（**写真4**）とエイ型ロボット（**写真5**）を開発しました．ヘビ型ロボットでは電極を多数に分割することによって，あたかも複数の独立した筋肉があるかのような動作を実現しています．柔軟なアクチュエータを用いる利点として，アクチュエータをロボットの構造部材としても利用できることが挙げられます．つまり，全身が柔軟なロボットが実現できる利点があります[6][17]．

魚や海ヘビなどの水中生物は体をくねらせて泳ぎますが，全身が柔軟な水中ロボットにおいても同じように，流体との力学的相互作用によって高効率な水中推進の可能性が期待されます．そのため，ヘビ型ロボットの屈曲に関する力学モデルをたて，その運動のシミュレーションや解析を行っています．

ヘビ型ロボットが実際に水中を推進するときの屈曲形状を計測したものを，**図10**に示します．黒い線が計測データ，赤い線は包絡線で，上から時刻順に並んでいます．実験では空間的に一様振幅の電圧を入力したにも関わらず，頭部から尾部に向かって振幅が大きくなることが確認されました．同様の振幅増大は生物の推進にもみられ，興味深い現象です．**図11**は，屈曲形状をシミュレーションした時空間プロットです．力学モデルから計算した形状は実験結果に近く，頭部から尾部に向かって振幅が増大する同様の現象が確認されました[15]．

また，エイ型ロボットでは胴体にCPUや駆動回路を搭載できるため，小型コントローラと後述の小型アンプ，リチウム・ポリマー電池を用いて自立駆動を実現しています．

表1[3],[7] 高分子アクチュエータの比較

	イオン導電性高分子アクチュエータ（IPMC）	電子導電性高分子アクチュエータ	電歪高分子アクチュエータ（誘電エラストマー）
発生ひずみ	1%～10%	1%～10%	10%～30%
発生応力	0.1MPa～1MPa	数MPa～数百MPa	数百kPa～数MPa
応答の速さ	比較的高速（数十Hz）	比較的低速（1Hz未満）	高速（数百Hz）
変形方向	屈曲	伸縮	伸展
印加電圧	数V	数V	数千V
動作環境	溶媒が必要	溶媒が必要	空中

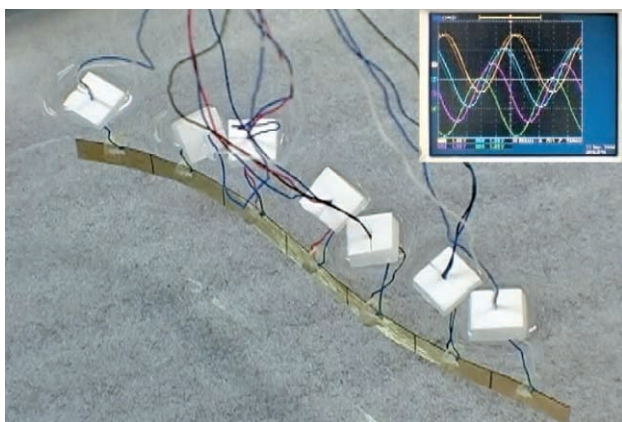



写真4[6],[15] ヘビ型ロボット

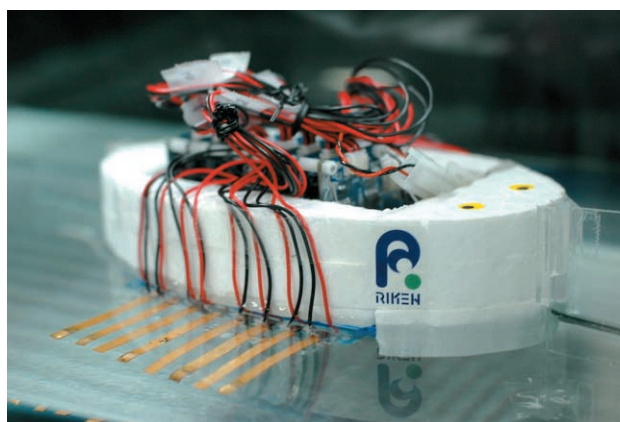



写真5[17] エイ型ロボット

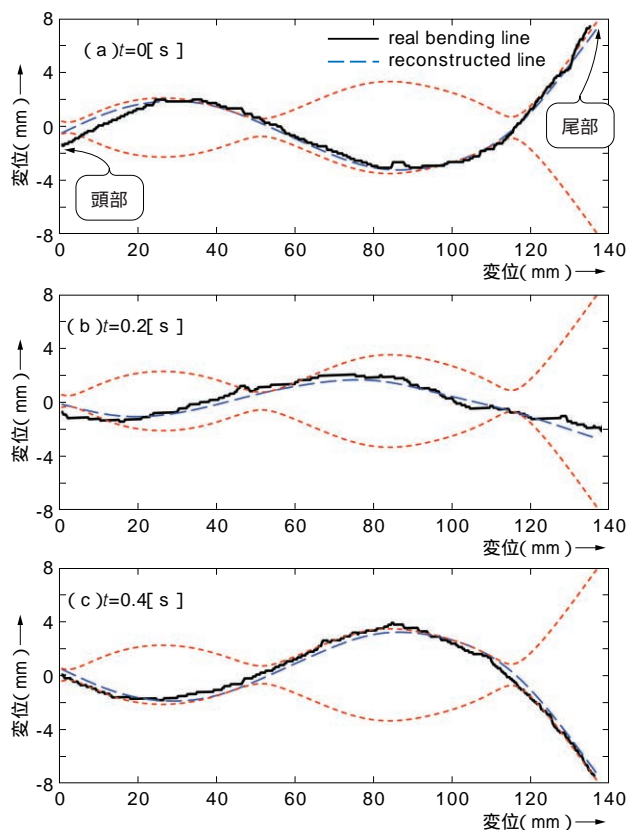



図10[15]　ヘビ型ロボットが実際に水中を推進するときの屈曲形状を計測したデータ

一様振幅の電圧を入力したにも関わらず頭部から尾部に向かって振幅が大きくなる．

図11[15]
ヘビ型ロボットの屈曲形状をシミュレーションした時空間プロット

頭部から尾部に向かって振幅が増大する同様の現象が確認できた．

写真6[17]
IPMC駆動用小型アンプ

● IPMC駆動用小型アンプ

小型水中ロボットを駆動する際に，大きなアンプがあっては自由に動くことができません．そのため，小型リニア・アンプを開発しました．**写真6**にアンプを搭載した基板を示します．OPアンプとトランジスタを用いたもので，基本回路は一般的によく用いられるものと同じですが，小型化を念頭において3cm×4cmの基板に2チャネルを実装しています．参考までに，**図12**に回路図を示します．定格電圧は±5Vです．電流は最大±500mAで制限がかかるように設計してあります．

IPMCは容量性のインピーダンスを持ち，サイズのわりに電流が流れるので，駆動回路での消費エネルギーが大きくなってしまいます．そのため，インピーダンスのモデルを用いた高効率な駆動方法や，駆動回路の設計，開発が今後の課題でしょう．

● 歩行ロボット

理化学研究所では生物模倣の観点から，歩行ロボット(**写真7**)のアクチュエータとしての利用も，東京工業大学と共同で研究しています．脚を模した単純なリンク機構が重力によって坂道を歩き下る受動歩行と呼ばれる現象がありますが，その力学的に自然な歩行パターンをヒントにした制御方法と，IPMCを用いた直動型の動作機構を組み合わせて，ロボットの歩行実験を行いました[10]．

● 機構開発：直動型，回転型アクチュエータ

IPMCは原理的に屈曲するアクチュエータであるため，望みの動作を取り出すには機構を工夫する必要があります．応用において必要な動作の多くは，直動と回転動作だと考えられます．パンタグラフに似た構造を用いて，IPMCの屈曲動作を直動動作に変換する機構が提案されました(**写真8**)[10]．これは，モジュール化することによって変位・力を足し合わせることができます．また，ぜんまいにヒン

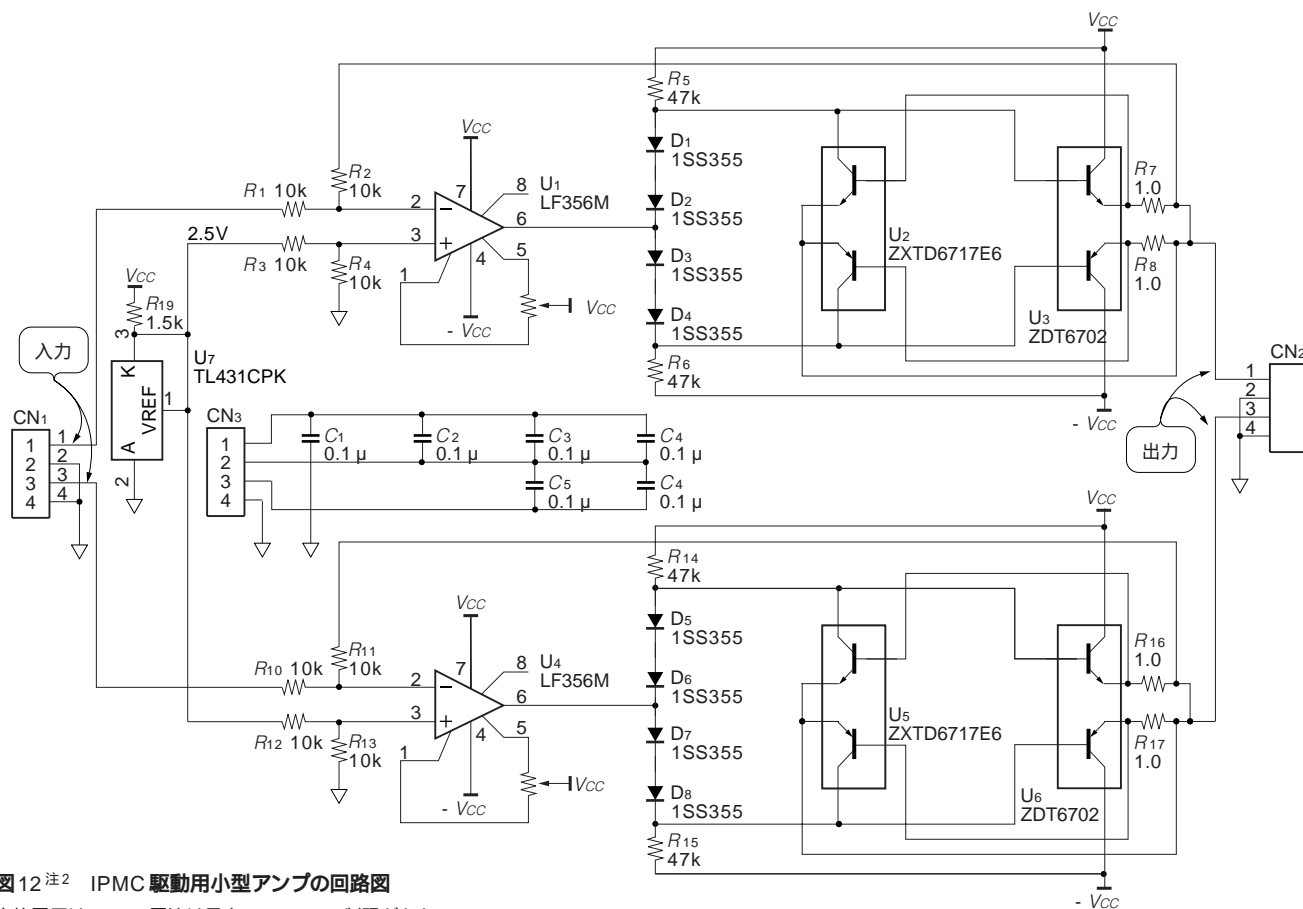



図12[注2]　**IPMC駆動用小型アンプの回路図**
定格電圧は±5V．電流は最大±500mAで制限がかかる．
注2：写真と図は東工大・理研BMC提供．

写真7[注2]
歩行ロボット

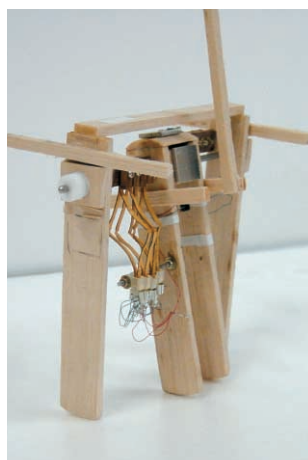



写真8[注2]　**IPMCの屈曲動作を直動動作に変換する機構**

トを得て，屈曲動作を回転運動に変換する有限回転型の機構を提案しています（**写真9**）．

● その他の研究

IPMCはアクチュエータとしてだけではなく，センサとしても利用できます．また，アクチュエータのモデル化に関する研究も行われています．例えば，1Vの電圧を加えたときにどのくらいの電流が流れるでしょうか．また，どのくらいの力，または変形が生じるでしょうか．これを定

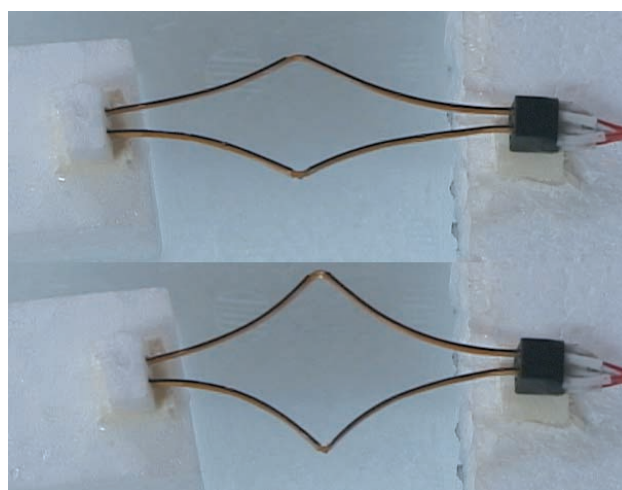
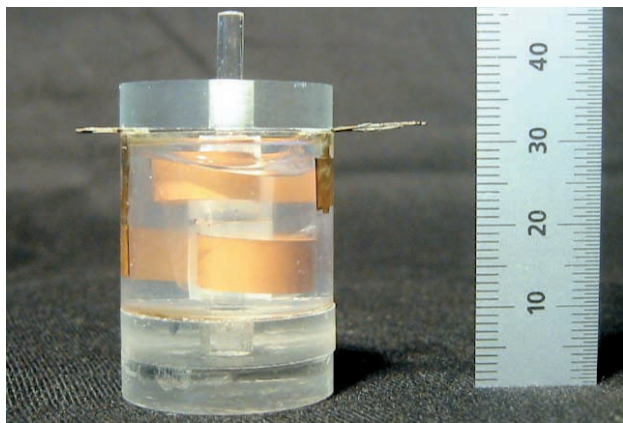



写真9(16)　屈曲動作を回転運動に変換する有限回転型の機構

量的に数式などで表現することをモデル化と呼び，表現された形式を数理モデルと呼びます．数理モデルは物理原理から導かれる基礎方程式や，または観測した入出力データから求めます．数理モデルの研究は，物理現象の理解という目的に加え，アクチュエータの形状設計や，駆動方法，回路の設計などに用いることができます．

＊　　＊

ロボットのための柔軟な人工筋肉として，3種類の電場応答性高分子アクチュエータについて紹介しました．筆者の浅学のため，ゲル・アクチュエータなど他にも多くの電場応答性高分子材料について紹介できなかったことや，内容に偏りがあることはご容赦いただきたいと思います．

また，生物の筋肉特性との比較を作業レベルで行いながら，高分子材料開発を進めて行くことが重要でしょう．電場応答性高分子はロボティクスはもちろんのこと，さまざまな分野に応用が期待される材料であり，本稿によって興味をもっていただけたのであれば幸いです．

参考・引用*文献

(1) S. アシュレー；動き始めた人工筋肉，日経サイエンス，2004年2月号，日経サイエンス．
(2) 特集 ニューアクチュエータ，日本ロボット学会誌，15(3)，1997年，日本ロボット学会．
(3)* 特集 次世代アクチュエータ，日本ロボット学会誌，21(7)，2003年，日本ロボット学会．
(4) 特集『からだ』と「カラダ」，日本機械学会誌，107(1033)，pp.926-929，2004年，日本機械学会．
(5) 特集 スマートマテリアル/コンポジット，日本ロボット学会誌，24(4)，2006年，日本ロボット学会．
(6)* 小川，中坊，向井，安積，大西；人工筋肉を利用したヘビ型水中推進ロボット，計測自動制御学会論文集，Vol.42，No.1，pp.80-89，2006年．
(7)* S. Wax, R. Sands； Electroactive Polymer Actuators and Devices, Proc. SPIE, vol.3669, 1999.
(8) 長田義仁監修編著代表；ソフトアクチュエータ開発の最前線，2004年9月，エヌ・ティー・エス．
(9) Editor(s)： Yoseph Bar-Cohen； Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles, Reality, Potential, and Challenges, Second Edition, SPIE press, 2004.
(10) M. Yamakita et al.； Robotic Application of IPMC Actuators with Redoping Capability, Electroactive Polymers for Robotic Application： Artificial Muscles And Sensors (Editor： Kwang J. Kim and Satoshi Tadokoro), Springer-Verlag, 2007.
(11)* Dr. Yoseph Bar-Cohen； WorldWide Electroactive Polymer Actuators Webhub.
http：//eap.jpl.nasa.gov/
(12) 世界トップの高分子アクチュエータ技術の研究開発と実用化を目指して，イーメックス．
http：//www.eamex.co.jp/
(13) Artificial Muscles Inc.
http：//www.artificialmuscle.com/
(14) 誘電エラストマー，SRI International.
http：//www.sri.com/esd/video/2Dmer_july06.avi
(15)* 高木，中坊，羅，向井；IPMCを用いたヘビ型水中ロボットにおける屈曲振幅増大現象のモデル化と解析，システム制御情報学会論文誌，vol.19, no.8, pp.319-326, 2006年．
(16)* K. Takagi, Z. W. Luo, K. Asaka, K. Tahara ; Limited-Angle Motor Using Ionic Polymer-Metal Composite, Proceedings of SPIE Vol.5759, pp.487-496, 2005.
(17) * K. Takagi, M. Yamamura, Z. W Luo, M. Onishi, S. Hirano, K. Asaka, Y. Hayakawa ; Development of a Rajiform Swimming Robot using Ionic Polymer Artificial Muscles, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1861-1866, 2006.
(18) ヘビ型水中推進ロボット，理化学研究所．
http：//www.bmc.riken.jp/~nakabo/snake_swim/snake.html

たかぎ・けんたろう
名古屋大学大学院 工学研究科
独立行政法人理化学研究所
バイオ・ミメティックコントロール研究センター

Zhi-Wei Luo
神戸大学大学院 工学研究科
独立行政法人理化学研究所
バイオ・ミメティックコントロール研究センター

<筆者プロフィール>
高木賢太郎．名古屋大学工学研究科助手，理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター客員研究員．
スマートマテリアルの制御応用，ロボティクス，生体筋計測に関する研究に従事．博士(工学)．